



**universitätsverlag**  
*ilmenau*

---

*Linß, Sebastian; Zentner, Lena:*

**Einfluss der Festkörpergelenkkontur auf die  
Bewegungsgenauigkeit und die Gestaltfestigkeit nachgiebiger  
Koppelmechanismen**

**URN:** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-355-9

**URL:** <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-355-9>

---

***Erschienen in:***

10. Kolloquium Getriebetechnik : Technische Universität Ilmenau, 11. - 13.  
September 2013. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - S. 355-372.  
(Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 2)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-065-5 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033>

# **EINFLUSS DER FESTKÖRPERGELENKKONTUR AUF DIE BEWEGUNGSGENAUIGKEIT UND DIE GESTALT FESTIGKEIT NACHGIEBIGER KOPPELMECHANISMEN**

*Sebastian Linß, Lena Zentner*

TU Ilmenau, Fachgebiet Mechanismentechnik / sebastian.linss@tu-ilmenau.de

## **Abstract**

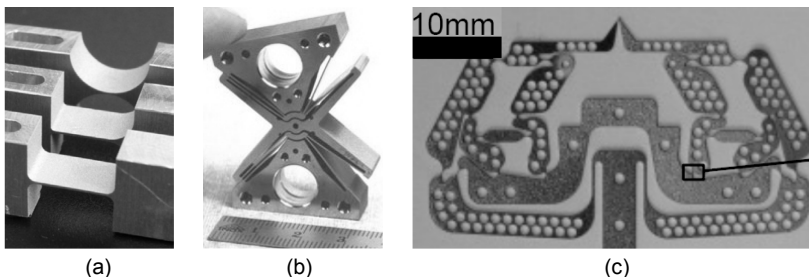
Aufgrund ihrer Vorteile werden nachgiebige Mechanismen vielfach für Führungs- und Übertragungsaufgaben in Präzisionsbewegungssystemen eingesetzt. Hierbei werden vorwiegend prismatische Festkörpergelenke mit Aussparungen als stoffschlüssige Drehgelenke verwendet. In diesem Beitrag wird das Potenzial zur Beeinflussung der Bewegungs- und Festigkeitseigenschaften verschiedener nachgiebiger Koppelmechanismen durch gezielte geometrische Gestaltung der Abmessungen und insbesondere der Aussparungskontur der Festkörpergelenke verdeutlicht. Dies stellt einen neuen Ansatz bei der Synthese nachgiebiger Mechanismen dar. Mittels FEM-Untersuchungen kann u. a. gezeigt werden, dass Polynomkonturen 4. Ordnung besonders günstig im Hinblick auf die gleichzeitige Realisierung einer hohen Bewegungsgenauigkeit und Gestaltfestigkeit sind.

Due to their advantages compliant mechanisms are state of the art in high precise motion systems for guiding and transfer tasks. Therefor especially prismatic flexure hinges with basic notches are used as revolute joints. In this contribution, the potential of influencing the motion behavior and as well the strength of several compliant linkage mechanisms by specific design of the flexure hinges dimensions and in particular of their notch contour is described as a newly considered part of the compliant mechanism synthesis. Using FEM simulations it can be shown, that polynomial contours 4<sup>th</sup> order are suitable to realize both, a high precise guiding and structural strength.

# 1 Einführung

In der Präzisionstechnik ist die Umsetzung von Bewegungen höchster Genauigkeit von großer Bedeutung. Für Vorrichtungen und Geräte in der Feinwerktechnik und im Zuge fortschreitender technischer Entwicklungen verstärkt auch bei mikromechanischen Systemen und auf dem Gebiet der Nanotechnologie ergeben sich besondere Anforderungen an das Antriebs- bzw. Bewegungssystem, die mithilfe von konventionellen Starrkörpermechanismen nur unter hohem konstruktiven Aufwand oder u. U. gar nicht realisierbar sind. Für makroskopische Anwendungen sind nachgiebige Mechanismen auf Basis von Festkörpergelenken eine oftmals eingesetzte Alternative für spezielle Führungs- und Übertragungsaufgaben ([1], [2]). Ermöglicht durch neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren existiert darüber hinaus ein Trend zur zunehmenden Miniaturisierung feinmechanischer Strukturen, der in der Mechanismentechnik in Deutschland seit Anfang der Neunzigerjahre zu beobachten ist [3].

Aufgrund ihrer Vorteile haben sich nachgiebige Mechanismen mit konzentrierter Nachgiebigkeit als monolithische Koppelmechanismen in vielen technischen Einsatzgebieten etabliert. In diesen aus einem Stück bestehenden Mechanismen wird die Beweglichkeit ausschließlich durch Festkörpergelenke realisiert, die für geringe Winkelauslenkungen alternativ zu form- und kraftgepaarten Drehgelenken eingesetzt werden ([4], [5]). Für Führungs- und Übertragungsaufgaben in Präzisionssystemen der Mikro-, Feinwerk- und Messtechnik werden überwiegend prismatische Festkörpergelenke mit einfachen Aussparungen als ebene stoffschlüssige Drehgelenke verwendet.



**Abb. 1:** Bestehende Ansätze zur geometrischen Gestaltung von Festkörpergelenken und von nachgiebigen Mechanismen: (a) Verwendung von Standardkonturen, (b) Erhöhung der Gelenkkomplexität [6] oder (c) Erhöhung der Gelenkzahl in der kinematischen Struktur [8]

Festkörpergelenke besitzen aufgrund der vorliegenden Stoffkoheränz einen limitierten Bewegungsbereich, der durch die maximal zulässigen Spannungen begrenzt wird. Zudem ist die belastungsabhängige Verlagerung ihrer Drehachse nachteilig. Die geometrische Gestaltung einzelner Festkörpergelenke hat daher im Allgemeinen eine spezifische Nachgiebigkeit und ein möglichst kleines Verhältnis von Maximalspannung zur Auslenkung zum Ziel. In der Feinwerktechnik gibt es Untersuchungen zur Vergrößerung des Bewegungsbereiches und der gleichzeitigen Verringerung der Drehachsenverlagerung, wodurch entweder immer komplexere Festkörpergelenke entstehen (z. B. [6], [7]) oder die Anzahl der Festkörpergelenke in der kinematischen Struktur deutlich erhöht wird (z. B. [8], [9]), siehe Abb. 1. Standardmäßig werden hier jedoch symmetrische Halb- oder Viertelkreis-konturen für die beidseitigen Aussparungen prismatischer Festkörpergelenke verwendet. Eine mehrkriterielle Optimierung der Aussparungskontur im Hinblick auf die beiden beschriebenen, oftmals gegensätzlichen, Kriterien ist bis auf vereinzelte Ausnahmen nicht Forschungsgegenstand [10].

Verglichen mit Starrkörpermechanismen, bei denen Struktur- und Maßsynthese in der Literatur ausführlich behandelt werden, sind relevante Einflüsse bei der geometrischen Gestaltung von Festkörpergelenken im Hinblick auf die Synthese nachgiebiger Mechanismen nur unzureichend untersucht. Hierzu zählt insbesondere die Auswirkung der Drehachsenverlagerung einzelner Festkörpergelenke auf das Bewegungsverhalten des gesamten Mechanismus. Für mehrgliedrige nachgiebige Koppelmechanismen werden in der Literatur die Vorteile der Verwendung von Gelenken mit verteilter Nachgiebigkeit gegenüber konzentrierten Gelenken mit Rechteck- und Kreiskontur hinsichtlich des erreichbaren Bewegungsbereiches beschrieben [11]. Weiterhin existieren Untersuchungen verschiedener vier- und höhergliedriger Geradführungsmechanismen auf der Basis von Kreisgelenken mit unterschiedlichen Gelenkabmessungen ([12], [13]) sowie vergleichende Studien zum Einfluss von Gelenken mit unterschiedlichen Standardkonturen auf das Bewegungsverhalten ausschließlich für eine diskret vorgegebene Gelenklänge und -höhe [5]. Die Realisierung einer präzisen Bewegung ist nicht nur bei Führungsmechanismen eine Herausforderung, sondern auch bei der Gestaltung von Übertragungsmechanismen ([8], [14]). Zu makroskopischen Greifern für die Mikropositionierung gibt es bis auf wenige Ausnahmen ([15], [16]) keine Erkenntnisse zum Einfluss der Festkörpergelenkkontur auf die Führungs- und Übertragungseigenschaften.

Anknüpfend an eigene Untersuchungen ([17], [18]) soll in diesem Beitrag mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) gezeigt werden, dass die realisierbare Bewegungsgenauigkeit von mehrgliedrigen nachgiebigen Geradföhrungsmechanismen und von nachgiebigen Greifern durch die Gelenkabmessungen und in besonderem MaÙe durch die Aussparungskontur der Festk6rpergelenke bestimmt wird. Aus diesem Grund werden beide Aspekte als zusatzliche – bisher nicht betrachtete – freie Parameter bei der mehrkriteriellen Synthese nachgiebiger Koppelmechanismen berucksichtigt.

## 2 Material und Methoden

Da die Föhrungs- und Übertragungseigenschaften nachgiebiger Koppelmechanismen von verschiedenen Parametern abh6ngig sind, ist die modellbasierte Untersuchung der Festk6rpergelenkabmessungen und der -kontur f6r vier verschiedene Beispielmeehanismen Gegenstand dieses Beitrages:

- Viergliedrige Geradf6hrungen nach EVANS und ROBERTS [19],
- Mehrgliedrige Greifer nach CHRISTEN [5] und KEOSCHKERJAN [20].

Aufgrund der kontinuumsmechanischen Problemstellung ist die f6r Starrk6rpermechanismen angewendete sequentielle Vorgehensweise von Synthese und konstruktiver Gestaltung nicht auf nachgiebige Mechanismen 6bertragbar [5]. Da neben einer Bewegungsaufgabe meist auch eine bestimmte Kraft-Verformungs-Charakteristik realisiert werden soll, m6ssen bei der Synthese nachgiebiger Mechanismen die kinematischen und kinetischen Eigenschaften zusammen berucksichtigt werden [21]. Gleichzeitig ist eine Betrachtung der Gestaltfestigkeit erforderlich. Prinzipiell lassen sich hierbei zwei Synthesemethoden unterscheiden: Der Ansatz der *Ersetzung von Starrk6rpermechanismen* ist hinsichtlich der erreichbaren Bewegungsgenauigkeit besonders geeignet, dagegen l6sst sich mit *topologieoptimierten Strukturen* eine gew6nschte Steifigkeitscharakteristik besser realisieren [22]. Die hier angewendete Vorgehensweise basiert auf der Ersetzung von Starrk6rpermechanismen und beinhaltet die Teilschritte:

1. Festlegung kinematischer Parameter des Starrk6rpermechanismus,
2. Modellierung des nachgiebigen Mechanismus,
3. Modellierung der Festk6rpergelenke mit versch. Aussparungskonturen,
4. FEM-Analyse des nachgiebigen Mechanismus sowie Ergebnisauswertung, Verifikation und ggf. iterative Verbesserung.

Diese Vorgehensweise unterscheidet sich von bestehenden Ansätzen (z. B. [13], [21]) darin, dass insbesondere der Einfluss der Festkörpergelenkkontur als Funktion der Gelenkabmessungen auf das Bewegungsverhalten des nachgiebigen Mechanismus während der Synthese berücksichtigt wird. Zur Beschreibung der Festkörpergelenkkontur werden in Ergänzung zu halbkreisförmigen oder elliptischen Standardkonturen optimierte Viertelkreis-[23] und Polynomkonturen [24] verwendet, siehe Abschnitt 2.3.

Das Ziel dieses Beitrages ist die Untersuchung des qualitativen und quantitativen Einflusses von einzeln optimierten Festkörpergelenkkonturen auf die Führungs- und Übertragungseigenschaften nachgiebiger Koppelmechanismen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Festkörpergelenken. Hierfür werden die folgenden drei Untersuchungskriterien betrachtet:

- Bewegungsgenauigkeit (Abweichung der Bewegung eines betrachteten Punktes im Vergleich zum Starrkörpermechanismus),
- Gestaltfestigkeit (Spannungsverteilung/Wert der Maximalspannung),
- Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit (Kraft-Weg-Zusammenhang).

## 2.1 Ausgangspunkt Starrkörpermechanismus

Die beiden viergliedrigen Geradföhrungsmechanismen nach EVANS und ROBERTS bieten eine einfache Möglichkeit zur Realisierung einer angenäher-ten Geradföhrung eines Koppelpunktes C, siehe Abb. 2. Entsprechend dem kinematischen Schema der totalen asymmetrischen bzw. symmetrischen Doppelschwinge ermöglichen diese Lenkergeradföhrungen bei Beachtung geometrisch günstiger Konfigurationen der kinematischen Abmessungen eine Föhrungsabweichung im Mikrometerbereich [19]. Zur Bestimmung kinematischer Abmessungen sowie der Ausgangslage zur Ersetzung des Mechanismus wurde das Bewegungsverhalten der Starrkörpermechanismen computergestützt mithilfe der Software SAM 6.1 untersucht, wodurch der momentane Geradföhrungsfehler  $y_c$  ermittelt werden konnte, siehe Tab. 1.

**Tab. 1:** Kinematische Abmessungen, Ausgangslage und Geradföhrungsfehler der beiden untersuchten Föhrungsmechanismen

Lenkergerad-föhrung nach	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$c$ [mm]	$d$ [mm]	$\varphi$ [°]	Föhrungs-weg $x_c$ [mm]	Fehler $y_c$ [µm]
EVANS	50.0	100.0	50.0	50.0	300	-10	-55.7
ROBERTS	66.6	66.6	56.6	73.6	35	-10	-25.2

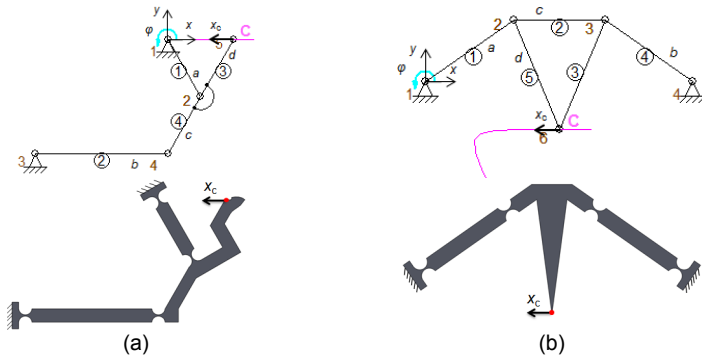
**Tab. 2:** Gelenkpunktkoordinaten und An- bzw. Abtriebspunktkoordinaten der beiden untersuchten Greifermechanismen

Punkt	Greifer nach CHRISTEN		Greifer nach KEOSCHKERJAN	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	-88.5	31	0	-25
2	-73	31	0	0
3	-73	6	50	0
4	0	0	50	29
5	0	-12	30	29
6	45	-31	30	58
7	45	-5	236	58
8	65	-5	236	29
9			287	29
10			287	-20

Für die beiden zu untersuchenden Greifermechanismen wurden in der Literatur unterschiedliche kinematische Ketten gewählt. Aufgrund der einfachen Struktur einer Kurbelschwinge lässt sich mit dem siebengliedrigen Greifer nach CHRISTEN [5] nur eine angenäherte parallele Greifbewegung realisieren, während der elfgliedrige Greifer nach KEOSCHKERJAN [20] eine exakte Parallelbewegung der beiden geführten Gliedebenen bzw. Wirkelemente ermöglicht, siehe Abb. 3. In letzterem Fall wird die parallele Greifbewegung durch Kreisschiebungen der Koppeln von zwei Parallelkurbeln erreicht. Die gewählten kinematischen Abmessungen der beiden untersuchten Greifer können anhand von Tab. 2 nachvollzogen werden.

## 2.2 Modellierung des nachgiebigen Mechanismus

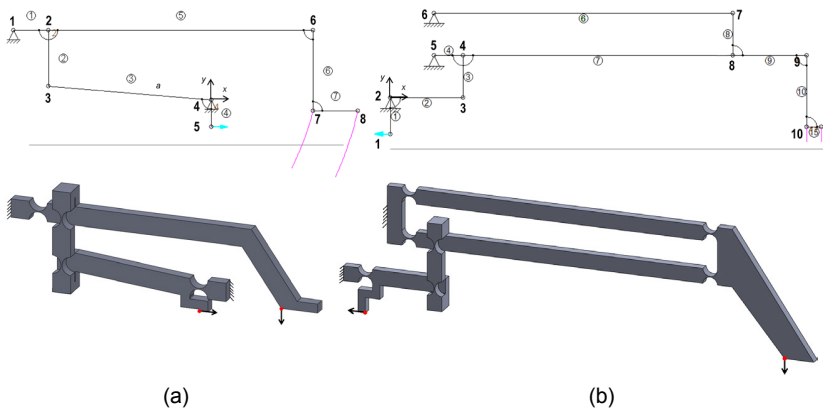
Ausgehend von der Methode der Ersetzung von Starrkörpermechanismen wurden die nachgiebigen Mechanismen basierend auf den festgelegten kinematischen Abmessungen als ein monolithischer Festkörpermechanismus im CAD-Modell modelliert, siehe Abb. 2 und Abb. 3. Dabei entsprechen die Mittelpunkte der Festkörpergelenke den Koordinaten der Drehgelenkpunkte des Starrkörpermechanismus. Als Randbedingungen fungierten Einspannungen der gestellfesten Festkörpergelenke. Als Antrieb wurde eine Linearverschiebung des Koppelpunktes C (Abb. 2) bzw. des Kurbelpunktes 5 und 1 (Abb. 3) parallel zur X-Achse gewählt.



**Abb. 2:** Starrkörpermechanismus und äquivalenter nachgiebiger Mechanismus der beiden untersuchten Führungsmechanismen: (a) Lenkergeradföhrung nach EVANS und (b) Lenkergeradföhrung nach ROBERTS

Für die FEM-Untersuchung wurden nachgiebige Mechanismen mit folgenden Gestaltungsmerkmalen betrachtet:

- ebene Mechanismen mit Rechteckquerschnitt der Glieder/Gelenke,
- prismatische und symmetrische Festkörpergelenke,
- Werkstoff: Aluminiumlegierung EN AW 7075 mit linear elastischem Materialverhalten ( $E = 72 \text{ GPa}$ ,  $\mu = 0.33$  und  $\rho = 2.8 \text{ gcm}^{-3}$ ).



**Abb. 3:** Halbmodell des Starrkörpermechanismus und äquivalenter nachgiebiger Mechanismus der beiden untersuchten Greifermechanismen (Symmetrielinie ist grau dargestellt): (a) siebengliedriger Greifer nach CHRISTEN und (b) elfgliedriger Greifer nach KEOSCHKERJAN

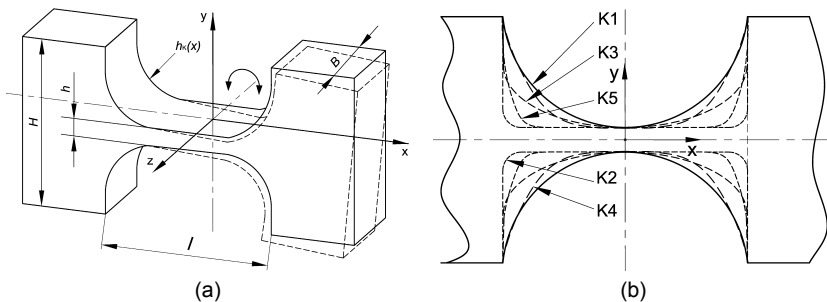


### 2.3 Modellierung der Festkörpergelenke

Geometrische Parameter der Abmessungen des Festkörpergelenkes sind die Gelenklänge  $l$ , die Gelenk- bzw. Gliedhöhe  $H$ , die minimale Gelenkhöhe/Stegdicke  $h$  und die Gelenkbreite  $B$ , siehe Abb. 4a. Für die FEM-Untersuchungen wurde die variable Höhe  $h_K(x)$  aller Festkörpergelenke des nachgiebigen Mechanismus jeweils mit der gleichen Aussparungskontur beschrieben (siehe Abb. 4b):

- K1 – Halbkreiskontur (Radius:  $2R = l$ ),
- K2 – spannungsoptimale Viertelkreiskontur (Radius:  $R = 0.1l$ ) [23],
- K3 – Ellipsenkontur (Halbradien:  $2r_x = 4r_y = l$ ),
- K4 – Polynomkontur 4. Ordnung nach Gleichung 1 ( $n = 4$ ) [24],
- K5 – Polynomkontur 16. Ordnung nach Gleichung 1 ( $n = 16$ ) [24].

$$h_K(x) = \frac{h}{2} + \frac{\left(\frac{H}{2} - \frac{h}{2}\right)}{\left(\frac{l}{2}\right)^n} \cdot x^n \quad (1)$$



**Abb. 4:** Geometrische Parameter der untersuchten Festkörpergelenke: (a) grundlegende Gelenkabmessungen und (b) Beschreibung der variablen Höhe mit unterschiedlichen Aussparungskonturen K1 bis K5

### 2.4 Festlegung der geometrischen Variationsparameter und diskrete FEM-Analyse des nachgiebigen Mechanismus

Mit den erstellten dreidimensionalen nachgiebigen Mechanismen wurde eine statische strukturmechanische FEM-Analyse mithilfe der Software ANSYS Workbench 14.0 durchgeführt, bei der auftretende große Verformungen mit der Einstellung „nichtlineare Geometrie“ berücksichtigt wurden. Aufgrund der

Symmetrie wurden bei beiden Greifern nur die Halbmodelle betrachtet. Um ausschließlich den Einfluss variierender Festkörpergelenkkonturen und Abmessungen auf die Eigenschaften des nachgiebigen Mechanismus zu untersuchen, wurden die Gelenkbreite und die Höhe des Gliedquerschnittes nicht geändert und mit  $B = 6$  mm bzw.  $H = 10$  mm festgelegt. Mit den verbleibenden drei geometrischen Parametern ergeben sich für die diskrete FEM-Analyse – als eine einfache gewählte Methode, verglichen mit einer kontinuierlichen Optimierung – 45 verschiedene nachgiebige Mechanismen für jeden der vier untersuchten Mechanismustypen durch Variation:

- der Aussparungskontur  $h_K(x)$  (fünf Konturen K1-K5, vgl. Abschnitt 2.3),
- der Gelenklänge  $l$  und der Stegdicke  $h$  (neun verschiedene Kombinationen mit  $l = 5, 10, 20$  mm und  $h = 0.3, 0.5, 1$  mm).

### 3 Ergebnisse

Zur Untersuchung der drei in Kapitel 2 beschriebenen Eigenschaften nachgiebiger Koppelmechanismen wurden mithilfe der diskreten FEM-Analyse folgende Größen bestimmt und ausgewertet:

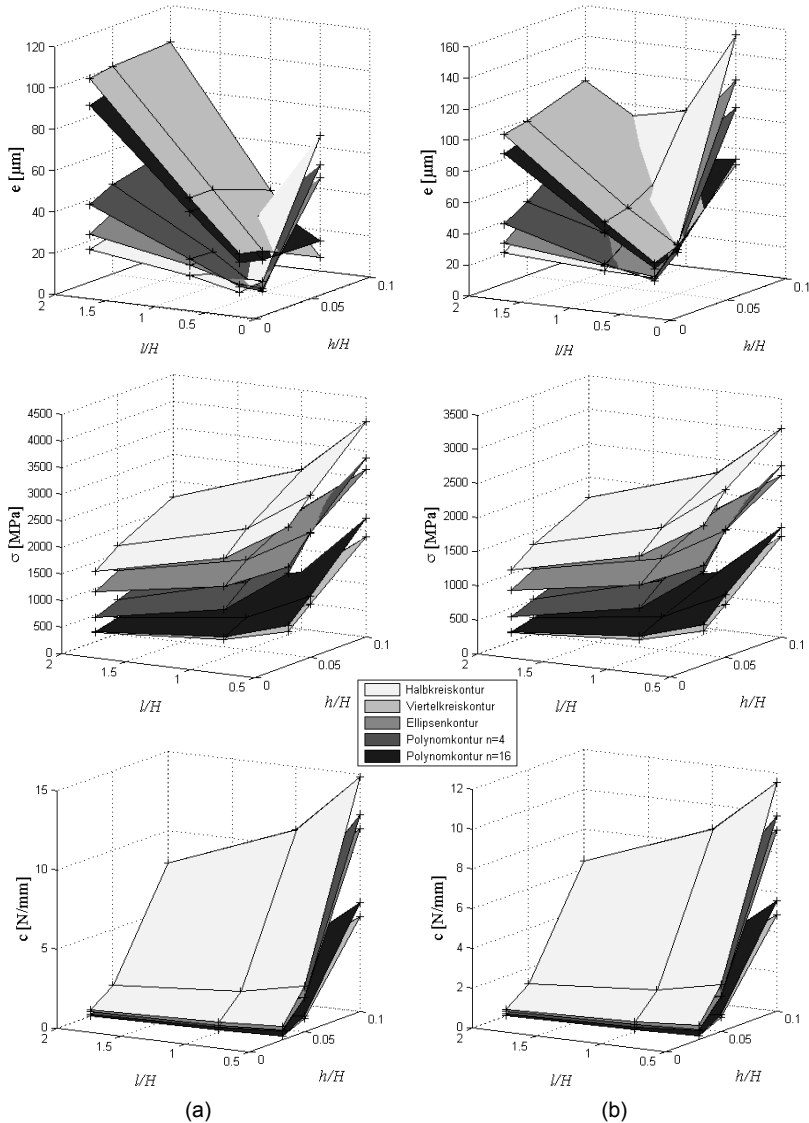
- Bahnabweichung  $e$  des jeweils betrachteten Punktes (zwischen den Bahnkurven des Starrkörper- und des nachgiebigen Mechanismus),
- maximale Vergleichsspannung  $\sigma$  nach von Mises (ortsunabhängig),
- Steifigkeit  $c$  (definiert durch die zur Verschiebung benötigte Kraft).

Die Simulationsergebnisse sind in Form einer Antwortfläche für jede Aussparungskontur K1 bis K5 in Abhängigkeit von der Gelenklänge  $l$  und der minimalen Gelenkhöhe  $h$  in Abb. 5 für die beiden Führungsmechanismen und in Abb. 6 für die beiden Greifermechanismen dargestellt.

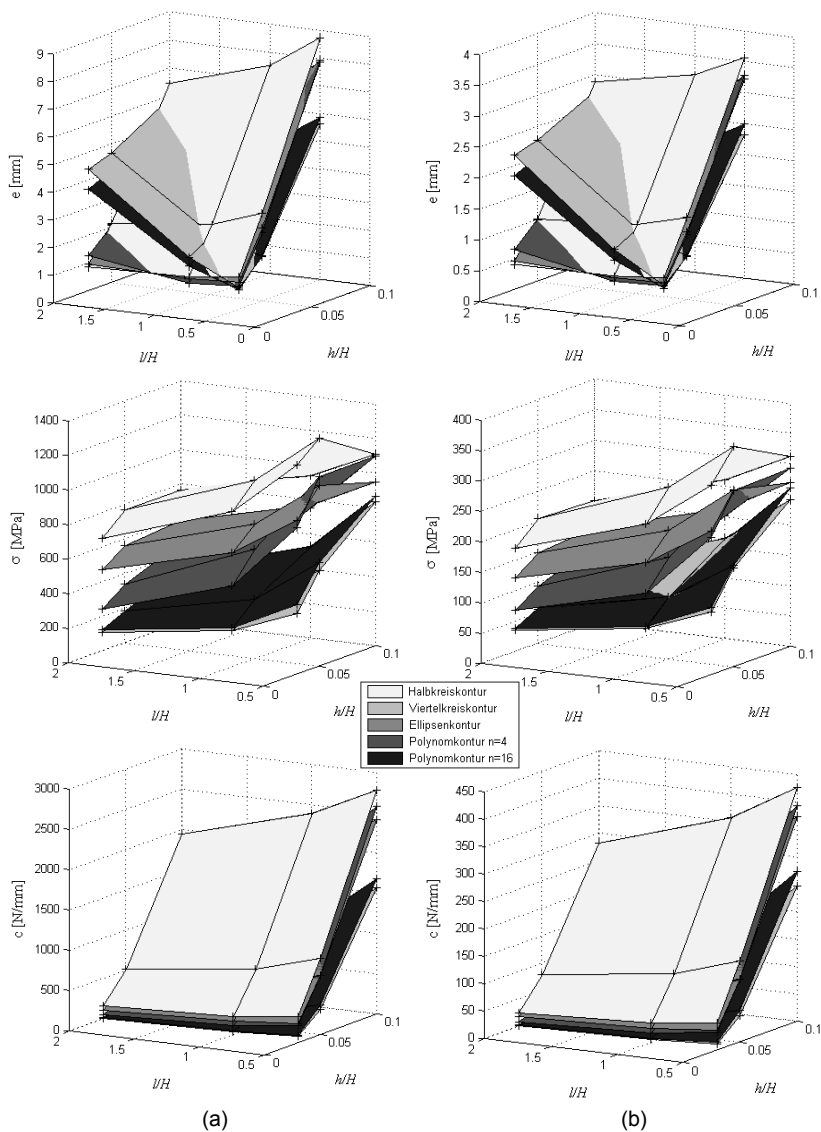
## 4 Diskussion

### 4.1 Bewegungsgenauigkeit

Um im Vergleich zum Starrkörpermechanismus in jedem Fall eine präzise Bewegung zu realisieren, ist keine Aussparungskontur generell am besten geeignet. Das Bewegungs- und Verformungsverhalten hängt von mehreren geometrischen Parametern des Festkörpergelenkes gleichermaßen ab.



**Abb. 5:** FEM-Ergebnisse für Bahnabweichung  $e$  (oben), Maximalspannung  $\sigma$  (mittig) und Steifigkeit  $c$  (unten) der nachg. Führungsmechanismen bei einer X-Verschiebung von -10 mm: (a) Lenkergeradführung nach EVANS und (b) nach ROBERTS mit jeweils vier Festkörpergelenken



**Abb. 6:** FEM-Ergebnisse für Bahnabweichung  $e$  (oben), Maximalspannung  $\sigma$  (mittig) und Steifigkeit  $c$  (unten) des halben nachgiebigen Greifers bei einer X-Verschiebung von 0.3 mm/-0.3 mm: (a) Greifer nach CHRISTEN (acht Gelenke) und (b) Greifer nach KEOSCHKERJAN (14 Gelenke)

Obwohl die Synthese nachgiebiger Mechanismen im Hinblick auf ein gewünschtes Bewegungsverhalten demnach ein mehrkriterielles Optimierungsproblem darstellt, lassen sich aufgrund der Auswertung der Bahnabweichung die folgenden neuen Zusammenhänge schlussfolgern:

- Die Gelenkabmessungen und insbesondere die Aussparungskontur haben einen großen Einfluss auf die Bewegungspräzision, wobei die Auswirkung einer Konturvariation größer sein kann, als die Änderung der Abmessungen.
- Das qualitative Verhalten ist unabhängig vom Mechanismustyp und weitestgehend unabhängig von Gelenkanzahl sowie Größenordnung der Abweichung  $e$  (Mikro- oder Millimeterbereich, vgl. Abb. 5/Abb. 6).
- Der Wert der Abweichung sinkt mit einer steigenden Gelenkanzahl, weil der Auslenkwinkel der Gelenke kleiner ist (vgl. Abb. 6a und b).
- Ein größer werdendes Verhältnis  $h/H$  (dickere Gelenke) verursacht stets höhere Abweichungen, während der Einfluss des Verhältnisses  $l/H$  (Längenänderung) von der Aussparungskontur abhängt.
- Für dünne Gelenke ( $h/H = 0.03$ ) sind Halbkreisconturen, aber auch Ellipsen- und Polynomkonturen 4. Ordnung hinsichtlich einer geringen Abweichung geeignet, während Viertelkreis- und Polynomkonturen 16. Ordnung einen großen Fehler verursachen.
- Für dünne Gelenke steigt der Einfluss einer Konturvariation mit zunehmender Gelenklänge  $l$ .

Ein weiteres Kriterium für die beiden nachgiebigen Greifer ist die Parallelität der Bewegung der zwei greifenden Endeffektor-Glieder. Für den Greifer nach CHRISTEN tritt eine geringe Rotation des Endeffektors von maximal  $6.5^\circ$  auf, während der Greifer nach KEOSCHKERJAN, wie auch beim Starrkörpermechanismus, in jedem Fall eine ideale parallele Ebenenführung erlaubt.

## 4.2 Gestaltfestigkeit

Der Bewegungsbereich von nachgiebigen Mechanismen wird u. a. durch die auftretenden Maximalspannungen in den Festkörpergelenken begrenzt. Die Ergebnisse für beide Geradführungs- und auch für beide Greifermechanismen verdeutlichen, dass die Festkörpergelenkkontur einen großen Einfluss auf die Gestaltfestigkeit hat, wobei die folgenden qualitativen Zusammenhänge unabhängig vom Mechanismustyp zu beobachten sind:

- Die Werte der Maximalspannung sinken mit einem größer werdenden Verhältnis  $l/H$  (längere Gelenke) und steigen mit einem größer werdenden Verhältnis  $h/H$  (dickere Gelenke) an.
- Die Werte der Maximalspannung sinken mit einer steigenden Gelenkanzahl in der kinematischen Struktur deutlich (siehe Abb. 6).
- Der Einfluss der Konturvariation ist vergleichbar mit dem Effekt der Änderung der Gelenkdicke  $h$  und größer als eine Variation der Länge  $l$ .
- Halbkreisconturen verursachen generell die höchsten Spannungswerte, während Viertelkreisconturen und Polynomconturen 16. Ordnung die kleinsten Spannungswerte ermöglichen. Beide letztgenannten Konturen sind besonders günstig im Hinblick auf die Gestaltfestigkeit.

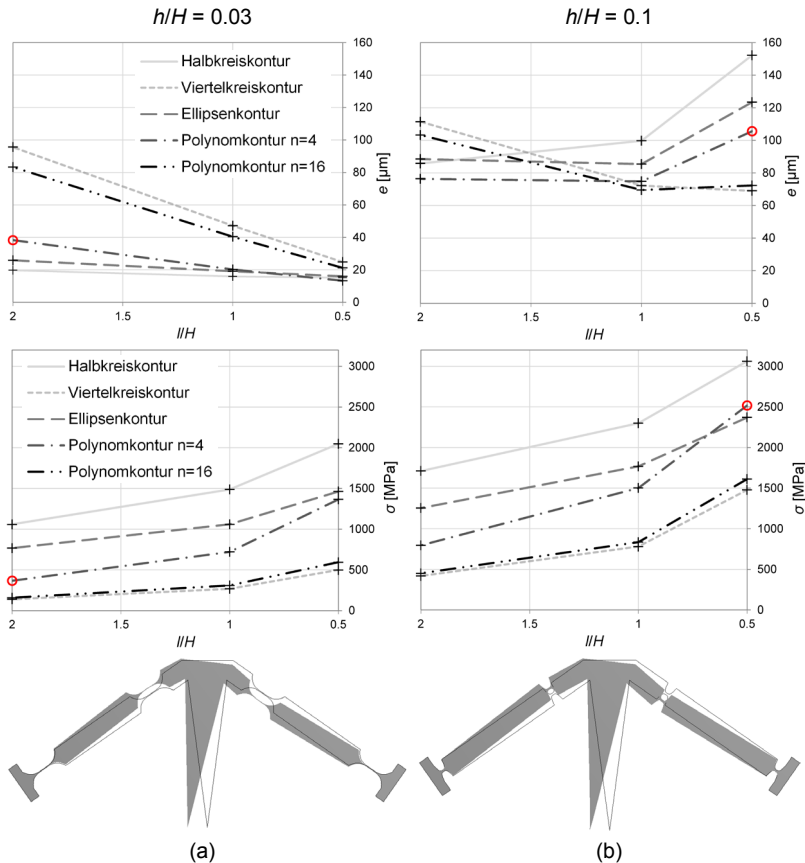
### 4.3 Steifigkeit

Auch die Charakteristik der Steifigkeitseigenschaften aller untersuchten nachgiebigen Mechanismen ist unabhängig vom Mechanismustyp und damit der Anzahl der Festkörpergelenke. Durch eine Variation der geometrischen Parameter des Festkörpergelenkes wird die Steifigkeit des gesamten Mechanismus wie folgt beeinflusst:

- Kürzere und dickere Gelenke führen zu einer vergrößerten Steifigkeit, wobei der Einfluss der Längenvariation für sehr dünne Gelenke nicht mehr signifikant ist.
- Der Einfluss der Konturvariation ist vergleichbar mit dem Effekt der Änderung beider Gelenkabhessungen  $h$  und  $l$ .
- Viertelkreisconturen und Polynomconturen 16. Ordnung ermöglichen die größte Nachgiebigkeit, während sich mit Halbkreisconturen große Steifigkeiten realisieren lassen (günstig hinsichtlich Eigenfrequenzen).

### 4.4 Fazit

Aufgrund des mehrkriteriellen Optimierungsproblems ist die generelle Empfehlung einer günstigen Aussparungskontur zur Realisierung einer präzisen Bewegung nicht unabhängig von den Festkörpergelenkabhessungen möglich. In Abb. 7 sind die Ergebnisse des ROBERTS-Lenkens exemplarisch für zwei unterschiedliche Stegdicken hinsichtlich der gegensätzlichen Kriterien Bewegungsgenauigkeit und Gestaltfestigkeit dargestellt.



**Abb. 7:** FEM-Ergebnisse für Bahnabweichung  $e$  (oben), Maximalspannung  $\sigma$  (mittig) sowie unverformter/verformter Zustand für Polynomkonturen 4. Ordnung (unten, dargestellte Mechanismen mit Kreismarkierung in Diagrammen) am Beispiel des ROBERTS-Lenkens bei 10 mm Verschiebung: (a) für die Stegdicke  $h/H = 0.03$  und (b) für  $h/H = 0.1$

Infolge der vorgestellten Ergebnisse wird der aktuelle Stand der Forschung durch die folgenden drei Schlussfolgerungen erweitert:

- Durch die Erhöhung der Festkörpergelenkanzahl in der kinematischen Struktur lassen sich zwar die Absolutwerte für Führungsabweichung und Maximalspannung des nachgiebigen Mechanismus verringern, der qualitative Einfluss einer Konturvariation bleibt jedoch gleich.

- Ein Festkörpergelenk mit einer drehachsendgünstigen Aussparungskontur (z. B. Halbkreis- oder asymmetrische Kontur [18], [23]) muss nicht immer eine günstige Wahl bei der Gestaltung eines nachgiebigen Mechanismus sein (vgl. Abb. 7a oben mit Abb. 7b oben).
- Im Hinblick auf die gleichzeitige Realisierung einer hohen Bewegungspräzision und Gestaltfestigkeit sind Polynomkonturen 4. Ordnung besonders geeignet (vgl. Abb. 7a und b).

Die Ergebnisse dieses Beitrages stützen sich auf die Annahmen idealer Geometrien und homogener Werkstoffe sowie die Festlegung spezieller Variationsparameter für vier ausgewählte nachgiebige Koppelmechanismen. Weitere simulativ und auch messtechnisch zu untersuchende Parameter und Randbedingungen sowie Einflüsse bei der konstruktiven Gestaltung von monolithischen Mechanismen mit Festkörpergelenken sind:

- geometrische Parameter des Festkörpergelenkes (Einfluss der Skalierung der Gelenkabmessungen, optimierte Aussparungskonturen, unterschiedliche Symmetrieeigenschaften),
- konstruktive Realisierung der Festkörpergelenke im Mechanismus (Orientierung der Gelenke, begrenzter Bauraum, gleiche oder unterschiedliche Gelenke in einem Mechanismus, Ersetzungslage),
- Antriebsrandbedingungen (Ort, Betrag, Antriebsrichtung und konstruktive Realisierung einer rotatorischen Antriebsbewegung, wobei hierdurch auch Spannungseinträge im Antriebsglied auftreten können, die das Verhalten der Gelenkfestigkeit beeinflussen, siehe Abb. 6 Mitte),
- Abtriebsrandbedingungen (unterschiedliche Kraft- und Verschiebungsrandbedingungen in Ergänzung zum bisher betrachteten Leerlauf),
- Herstellungstechnologie und Auswirkungen geometrischer Toleranzen,
- Einfluss spezieller Effekte (z. B. Knickung, elastische Nachwirkungen).

Zusätzlich zur Vielfalt an Eingangsparametern existieren weitere relevante Zielkriterien für die Mechanismen- und Präzisionstechnik, die bisher nicht systematisch untersucht wurden, bspw.:

- Bewegungsübersetzung (Verhältnis Ein- zu Ausgangsverschiebung),
- thermisches Verhalten,
- Schwingungsverhalten.



## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird das Potenzial zur Beeinflussung der Bewegungs-  
genauigkeit und Gestaltfestigkeit verschiedener nachgiebiger Koppelmecha-  
nismen durch gezielte geometrische Gestaltung der Abmessungen und  
insbesondere der Aussparungskontur prismatischer Festkörpergelenke  
verdeutlicht. Exemplarisch wurden zwei nachgiebige Geradföhrungsmecha-  
nismen und zwei nachgiebige Greifer mit unterschiedlicher Gelenkanzahl  
mithilfe von FEM-Simulationen untersucht. Geometrische Variationsparame-  
ter waren die Gelenklänge, die minimale Stegdicke und die Aussparungs-  
kontur, die mit fünf bekannten bzw. speziell ermittelten Geometrien  
beschrieben wurde.

Die Berücksichtigung der geometrischen Gestaltung der Festkörpergelenk-  
kontur stellt einen neuen, bisher nicht betrachteten Ansatz, bei der Synthese  
nachgiebiger Mechanismen dar. Die Ergebnisse bestätigen, dass es durch  
die Analyse der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Einzelgelen-  
ken möglich ist, günstige Festkörpergelenkkonturen für monolithische  
Koppelmechanismen vorzuschlagen. Im Hinblick auf die Bewegungseigen-  
schaften ist diese Vorgehensweise aufgrund der mehrkriteriellen Problem-  
stellung auf dünne Gelenke limitiert. Weiterhin zeigt sich, dass Polynomkon-  
turen 4. Ordnung als Aussparungen besonders günstig sind, um gleichzeitig  
eine hohe Bewegungs-  
genauigkeit und gute Gestaltfestigkeit zu realisieren. Die darüberhinausgehende Anwendung gezielt optimierter Festkörperge-  
lenkkonturen auf Basis von Freiformgeometrien bietet weiteres Forschungs-  
potenzial, wobei in diesem Zusammenhang auch Fragestellungen der  
technologischen Herstellung und Robustheit berücksichtigt werden müssen.

## Literatur

- [1] Howell, L. L.; Midha, A.: *A Method for the Design of Compliant Mechanisms with Small-Length Flexural Pivots*. In: *Journal of mechanical design* 116 (1994), Nr. 1, S. 280–290
- [2] Howell, L. L.; Magleby, S. P.; Olsen, B. M.: *Handbook of compliant mechanisms* : Wiley, 2013
- [3] Bögelsack, G.: Impulse und Wirkungen technologischen Fortschritts auf die Mechanismentechnik. In: *Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente* ; 255. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995, S. 131–142

- [4] Lobontiu, N.: *Compliant mechanisms: design of flexure hinges*. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2003
- [5] Christen, G.; Pfefferkorn, H.: Nachgiebige Mechanismen : Aufbau, Gestaltung, Dimensionierung und experimentelle Untersuchung. In: *VDI-Berichte Nr. 1423* 1998, 1998, S. 309–329
- [6] Henein, S.; Spanoudakis, P.; Droz, S.; Myklebust, L. I.; Onillon, E.: Flexure pivot for aerospace mechanisms. In: *Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, 2003
- [7] Fowler, R. M.; Magleby, S. P.; Howell, L. L.: Flex-16: A monolithic large-displacement compliant rotational hinge. In: *Proceedings of IDETC/CIE 2012*, 2012
- [8] Beroz, J.; Awtar, S.; Bedewy, M.; Tawfik S.; Hart A. J.: Compliant microgripper with parallel straight-line jaw trajectory for nanostructure manipulation. In: *Proceedings of the 26. Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, 2011
- [9] Cosandier, F.; Chatagny, V.; Clavel, R.: Optimizing the Design of the 13-Hinge Rectilinear Stage for High Straightness Translation. In: *Proceedings of the 13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2011, S. 8
- [10] Linß, S.; Erbe, T.; Theska, R.; Zentner, L.: The influence of asymmetric flexure hinges on the axis of rotation. In: *Proceedings of the 56th International Scientific Colloquium*, 2011
- [11] Pavlovic, N. T.; Pavlovic, N. D.: *Mobility of the compliant joints and compliant mechanisms*. In: *Theoretical Applied Mechanics* 32 (2005), Nr. 4, S. 341–357
- [12] Pavlovic, N. T.; Pavlovic, N. D.: A design of evans compliant four-bar linkage for rectilinear guiding. In: *Proceedings of the 3rd International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2003*, 2003, S. 425–432
- [13] Pavlovic, N. T.; Pavlovic, N. D.: *Compliant mechanism design for realizing of axial link translation*. In: *Mechanism and Machine Theory* 2009 (2009), Nr. 44, S. 1082–1091
- [14] Zubir, M.; Nashrul M.; Shirinzadeh, B.; Tian, Y.: *Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation*. In: *Sensors and actuators : international journal devoted to research and development of physical and chemical transducers* 150 (2009), Nr. 2, S. 257–266

- [15] Raghavendra, M. R. A.; Kumar, A. S.; Jagdish, B. N.: *Design and analysis of flexure-hinge parameter in microgripper*. In: *The international journal of advanced manufacturing technology* 49 (2010), Nr. 9, S. 1185–1194
- [16] Bharanidaran, R. Ramesh T.: Design of monolithic Microgripping device with integrated force sensing Jaw. In: *Proceedings of the 3rd European Conference of Mechanical Engineering (ECME' 12)*, 2012, S. 168–173
- [17] Linß, S.; Milojevic, A.: Model-based design of flexure hinges for rectilinear guiding with compliant mechanisms in precision systems. In: Zentner, L. (Hrsg.): *Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niß*. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2012 (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik, 1), S. 13–24
- [18] Linß, S.; Milojevic, A.; Zentner, L.: On the Influence of Flexure Hinge Geometry on the Motion Range and Precision of Compliant Gripping Mechanisms. In: *Proceedings of The 2nd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century*, 2013, S. 255–260
- [19] Wazan, O.: *Rechnergestützte Untersuchung und Auswahl von Koppelmechanismen für Geradführungen*. Ilmenau, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. 2005
- [20] Keoschkerjan, R.; Wurmus, H.: A novel microgripper with parallel movement of gripping arms. In: *Proceedings of the 8th International Conference on New Actuators*, 2002, S. 321–324
- [21] Modler, N.; Hufenbach, W.; Renner, O.; Knötig, T.; Modler, K.-H.; Li, S.: Auslegung und Gestaltung von Nachgiebigkeitsmechanismen. In: *Bewegungstechnik 2010 : Koppelgetriebe, Kurvengetriebe und geregelte Antriebe im Maschinen-, Fahrzeug-, und Gerätebau*. Düsseldorf : VDI, 2010, S. 177–190
- [22] Pavlovic, N. D.; Petkovic, D.; Pavlovic, N. T.: Optimal selection of the compliant mechanism synthesis method. In: *Proceedings of The International Conference Mechanical Engineering in XXI Century*, 2010, S. 247–250
- [23] Linß, S.; Zentner, L.: Gestaltung von Festkörpergelenken für den gezielten Einsatz in ebenen nachgiebigen Mechanismen. In: *9. Kolloquium Getriebetechnik 2011*, 2011, S. 291–311
- [24] Linß, S.; Erbe, T.; Zentner, L.: On polynomial flexure hinges for increased deflection and an approach for simplified manufacturing. In: *Proceedings of the 13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2011, S. A11\_512